

진동제어 콘크리트 개발에 관한 실험적 연구(I)

Experimental Study for the Development of Vibration-Controlled Concrete(I)



정영수*

Chung, Young-Soo



이대형**

Lee, Dae-Hyoung



최우성***

Choi, Woo-Sung

요 약

최근의 각종 사회시설의 확충에 따른 건설공사 및 교통시설 등은 많은 진동을 유발하여 사회적인 문제를 야기하고 있는 실정이다. 본 연구는 각종 제진재료를 이용하여 진동을 억제할 수 있는 콘크리트를 개발하여 각종 건설공사에서 흔히 발생할 수 있는 진동공해문제를 억제하고자 하며 아울러 폐기물의 재활용차원에서 폐자재를 이용하여 유용한 제진콘크리트를 개발하고자 하는데 그 목적이 있다. 우선, 제진재료를 이용한 압축강도 200kg/cm^2 이상의 콘크리트 배합비를 찾기 위하여 Pilot실험을 수행하였으며, 선정된 적정배합비에 따른 진동시험체를 제작하여 재료의 동적특성 즉, 1차공명진동수, 동탄성계수 및 감쇠비를 측정하여 제진효과를 조사하였다. 제진재료로서는 Foam, Latex, Rubber Powder 그리고 Plastic Resin 등을 사용하였으며 진동의 감쇠효과가 있는 것으로 나타났다. 실험방법으로는 KS F2437 규정과 진동파의 속도법을 사용하였으며, 감쇠비 측정은 Frequency Response Spectrum곡선에 대한 Polynomial Curvefitting방법과 기하학적 해석방법을 이용하여 각각의 결과를 비교·분석하였다.

* 정회원, 중앙대학교 토목공학과 부교수
** 정회원, 중앙대학교 대학원 토목공학과 박사과정
*** 정회원, 중앙대학교 대학원 토목공학과 석사과정

• 본 논문에 대한 토의를 1996년 12월 30일까지 학회로 보내주시면 1997년 2월호에 토의회답을 게재하겠습니다.

Abstract

Recently, the construction of infrastructures has been booming and accelerating to keep up with rapid economic growth. Construction activities and operation of transportation facilities cause unfavorable effects such as civil petitions associated with vibration-induced damages or nuisances. Accordingly, the objective of this study is to develop vibration-controlled concrete using various vibration-controlled mixtures, and also to recycle obsolete materials in part. As the first step to achieve this research, preliminary mix designs have been carried out to obtain an appropriate mix proportion above 200kg/cm^2 in uniaxial compressive strength. Test specimen based on the mix proportion selected have been actuated by the impact hammer to investigate their dynamic characteristics. Vibration-controlled mixtures are foam, latex, rubber powder and plastic resin, which have been determined to reduce a vibration by and large. KS F2437 and travel time method have been used to figure out 1st natural frequency and dynamic elastic moduli. Damping ratios have been computed by adopting the polynomial curvefitting method and the geometric analysis method on the frequency response spectrum curve, of which results have been compared and analyzed hereon.

Keywords : vibration-induced damages, vibration-controlled mixtures, mix proportion, travel time method, natural frequency, dynamic elastic moduli, dynamic damping ratios, polynomial curvefitting method, geometric analysis method, dynamic characteristics, frequency spectrum curve.

1. 서 론

국내의 각종 사회기반시설의 확충과 1997년 건설시장의 개방에 따른 국제환경의 변화에 대비하는 세계화의 운동은 점차 확대되면서 사회간접자본시설의 확충에 박차를 가하고 있다. 그러나 이러한 공사들을 실행하는데 있어서 진동 및 소음억제에 관한 많은 문제점이 야기되고 있지만, 국내에는 이러한 문제를 규제하기 위한 적절한 진동규제기준이 미흡한 형편이고, 지반진동의 폐해를 줄이기 위한 진동억제방안에 관한 연구도 거의 없는 형편이다. 따라서 본 연구의 목적은 증가일로에 있는 사회기반시설의 건설에 따른 진동을 감소시킬 수 있는 건설재료를 개발하는 것으로서 현재 당면하고 있는 시급하고 중요한 과제라 할 수 있다.

본 연구는 진동규제기준 설정을 위한 기본적인 연구의 일부로서 진동을 다소나마 억제시킬 수 있

는 제진콘크리트 재료의 개발에 관한 것이다. 진동감쇄가 극대화될 수 있는 제진재료의 특성을 연구하여 기존시설의 진동폐해 경감은 물론 앞으로 설계시공될 지하철공사, 경전철 및 고속철도공사의 진동규제가 필수적인 각종의 공사에 활용할 수 있는 방안을 모색하고자 한다. 또한, 본 연구는 현재 여러가지 사회문제 중의 하나인 폐기물 처리의 한 방안으로써 페타이어나 페플라스틱을 제진재료로 사용함으로써 폐기물의 재활용차원에서 많은 도움을 줄 수 있으리라 기대된다. 이들 재료의 경우 콘크리트와의 부착성이 문제가 될 수 있으나 이러한 문제점을 개선한다면 좋은 제진재료로서 상당히 이용가치가 높으리라 사료된다. 특히, 효과적인 제진콘크리트 재료가 개발되면 이러한 know-how는 최근의 건설시장 개방에 따른 효율적인 대비책의 하나로 생각될 수 있으며 현재 진행중에 있는 고속전철 및 대도시의 지하철, 경전철 등의 진동억제 방

안에 관한 유용한 자료를 제시할 수 있으리라 생각된다.

상기와 같은 연구를 수행하기 위해서 제진용 결합제로서 1) Foam, 2) Latex, 3) Rubber Powder 그리고 4) Plastic Resin 등을 사용하였으며, 각각을 사용한 제진 실험용 콘크리트 시험편에 대하여 충격햄머로서 Wave를 생성시킨 후 부착된 가속도감지기에 의해 감지된 Wave의 가속도에 대하여 FFT Analyzer로 Fourier변환을 수행하여 구한 Frequency response Spectrum으로부터 1차공명진동수를 조사하였다. 특히, 1차공명진동수 값 및 실험체의 재원으로부터 재료의 동탄성계수 등을 구하였으며, 재료의 감쇠비는 1차공명진동수 곡선에 대한 기하학적인 해석방법 및 Polynomial Curvefitting법을 사용하여 구하였다. 한편, 추가로 Travel Time법을 이용하여 재료의 동적특성을 조사하였으며 이들 실험결과값들을 서로 비교·분석하였다.

2. 배합실험

2.1 사용재료

각종의 제진재료를 이용한 콘크리트물탈의 압축강도가 약 200kg/cm^2 이상 되는 배합비를 찾기 위하여 24배치(batch)의 예비실험을 수행하였으며, 사용된 주요 재료는 S사의 1종 보통포틀랜드시멘트, 동해안의 표준사와 각종의 제진재료 즉 기포제, 라텍스, 고무가루분 및 플라스틱 원료이다. 한편, 강도를 증진시키기 위하여 S사의 고성능감수제(멜라민계)를 사용하였으며 슬럼프 값(콘크리트의 슬럼프 시험방법 KS F 2402에 의한 결과)을 일정하게 하기 위하여 감수제의 양을 조절하였다. 사용된 표준사의 단위중량은 $1.53\sim 1.6\text{t/m}^3$ 이다.

기포콘크리트제조를 위하여 사용된 기포제는 국내 H사의 동물성기포제이며, 기포는 물과 혼합된 기포제를 펌프에 의해 기포제 혼합장치에 주입한 후 Air Compressor의 분무압에 의해 형성되며 분무압의 크기 및 기포형성관내의 충전재료의 크기에 따라 기포의 밀도 및 강도 등이 결정되는 것으로 조사되었다.

Table 1 Chemical properties of animal protein foaming agents

Chemical Properties	pH(21℃)	Gravity	Viscosity(21℃)
Value	7.0	1.164	57cps

한편, 동적하중의 재하시 발생하는 진동의 크기를 억제하는 효과를 위해 사용된 Latex는 국내 K사의 KSL203제품을 사용하였으며 성분은 Table 2와 같다. 그리고, 국내 K사의 Rubber Powder 및 국내 Y사의 Plastic Resin을 혼합한 콘크리트는 페타이어 및 페플라스틱제품등의 재활용을 위한 예비실험으로서 다소나마 진동억제효과를 발휘할 것으로 보이며, 각각의 주요한 성분은 Table 3 및

Table 2 Chemical properties of latex KSL203

Solidity ingredient(%)	50
pH(25℃)	8.5
Surface tension(20℃)(dyn/cm)	50
BF Viscosity(BM, 25℃)(cps)	70
Gravity(25℃)	1.04
Mechanical Stability	양호
Chemical Stability	양호

Table 3 Chemical properties of rubber powder KTR101

Styrene Content(%)	30
Volatile Matter(%)	Max 1
Ash Content(%)	Max 0.6
Solution Viscosity(cps)	4500
Melt Flow Rate, 200℃/5kg(g/10min)	< 1
Specific Gravity	0.94
Hardness	78
Tensile Strength(Mpa)	25
Tensile Modulus(Mpa)	2.5
Elongation(%)	750

Table 4 Chemical properties of plastic resin B360F

Chemical Properties	Testing method	Unit	Value
MI	ASTM D1238	g/10min	16.0
Density	ASTM D792	g/cm ³	0.90
Formative Contraction	YUKONG	%	1.6
Du Pont Impact	Du Pont	23℃	63
		-10℃	50
Flexural Modulus	ASTM D790	kg/cm ²	14,000
Rockwell Hardness	ASTM D795	R scale	89
Tensile Strength(yield)	ASTM D638	kg/cm ²	260
Elongation(Break)	ASTM D638	%	130
Heat deformation temperature	ASTM D648	℃	98
Vicat Softening Point	ASTM D1525	℃	150

Table 4에 기술하였다.

다음 Photo 1은 제진재료로 이용한 Latex, Plastic Resin 및 Rubber Powder를 보이고 있다.

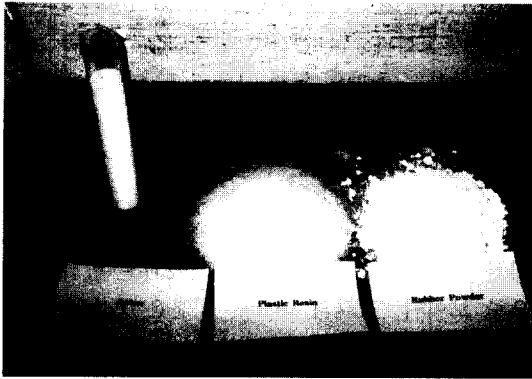


Photo 1 Vibration-controlled mixtures (latex, plastic resin, rubber powder)

2.2 압축강도

시멘트 몰탈의 압축강도시험은 KS F 2405[1]에 의하여 수행하였으며, 배합종류는 각 제진재료에 대한 최적혼입량을 Table 5에서 보인 바와 같이 6종류로 구분하였다. 시멘트몰탈의 물-시멘트비(W/C)는 48.5%로 통일, 고성능감수제는 슬럼프값(110±5mm)을 기준으로 첨가하였으며, 각각의 배합몰탈에 대한 강도특성을 비교·분석하였다. 동물성기포의 혼입량은 Table 5에서 보인 바와 같이 시멘트와 Foam의 용적비로 1 : 1에서 1 : 5까지 6배치를 배합하였으며, 라텍스, 고무가루분 및 플라스틱 원료 등을 혼입한 콘크리트몰탈은 각각 시멘트중량에 5%에서 30%까지 6배치를 배합하였다. 강도실험은 재령 3일, 7일, 28일에 각각 수행하였

Table 5 Uniaxial compressive strength test results of vibration-controlled concrete cylinders

Type	Specific number	Mixing ratio (M/C) %	Cement Weight(g)	Aggregate (g)	Compressive Strength(kg/cm ²)			Remarks
					3일	7일	28일	
Foam	F0	0	760	1862	136	307	362	
	F1	1 : 1	722		124	119	145	
	F2	1 : 2	684		78	63	109	
	F3	1 : 3	646		48	55	72	
	F4	1 : 4	608		32	50	35	
	F5	1 : 5	570		8	17	24	
Latex	L05	5	722	1862	64	117	214	*는 경화불량으로 압축강도를 측정하지 않음.
	L10	10	684		62	115	192	
	L15	15	646		66	115	190	
	L20	20	608		32	101	151	
	L25	25	570		*	66	145	
	L30	30	532		*	41	118	
Rubber Powder	R05	5	722	1862	115	126	181	
	R10	10	684		63	68	114	
	R15	15	646		34	41	72	
	R20	20	608		20	29	39	
	R25	25	570		14	13	27	
	R30	30	532		6	9	21	
Plastic Resin	P05	5	722	1862	102	207	290	
	P10	10	684		73	145	181	
	P15	15	646		58	103	119	
	P20	20	608		51	90	94	
	P25	25	570		30	60	91	
	P30	30	532		22	55	68	

Note 1) 라텍스, 고무가루분 및 플라스틱 레진의 혼입률은 시멘트 중량(C)에 대한 결합재의 중량(M)비임.

2) Foam 콘크리트의 혼입률은 시멘트와 Foam의 용적비임.

3) 시험체명 F0는 제진재료가 혼입되지 않은 일반콘크리트임.

으며 Table 5는 각종 제진재를 사용한 몰탈의 압축 강도실험결과이다.

압축강도는 혼입률이 작은 경우에는 Plastic Resin Concrete가 가장 양호하게 나타났으며 혼입률이 증가할수록 Latex Concrete가 높은 압축 강도를 나타내었다. Latex의 경우 경화속도가 느린 양상을 보였으며 이에 따라 일부 시험체는 3일 압축강도를 측정할 수 없었다. 한편, 혼입량의 증가에 따른 압축강도의 감소추세가 다른 재료에 비해 낮게 나타났다.

3. 진동실험

재료의 동적특성 즉 동탄성계수 및 감쇠비를 파악하기 위하여 도달시간시험(Travel Time Test)과 공명진동실험(Resonant Column Test)을 수행하여 결과값을 서로 비교분석하였다. 도달시간실험법은 콘크리트의 균일성이나 품질변화의 조사 및 압축강도의 추정에 이용되고 있으며, 초음파 속도법에 의한 콘크리트의 동탄성계수 시험방법⁽¹¹⁾으로서 시험체내에 가진햄머로 생성시킨 종파(Longitudinal Wave)의 도달시간을 구한 후 각각의 결과로부터 동탄성계수를 계산하는 방법이다. 또한, 공명진동실험은 종진동에 의한 가속도 곡선의 Frequency response Spectrum곡선으로부터 공명진동수를 구한 후, 이 진동수를 이용하여 동탄성계수를 구한다. 이 방법은 콘크리트 공시체의 가로, 세로 및 비틀림 1차 주파수 실험방법인 KS F 2437⁽¹¹⁾에 의한 실험이며 ASTM C 597-71⁽¹²⁾의 표준시험방법과 유사하며 JIS A 1127-1976⁽¹³⁾과도 동일하다. 한편, 동포아손비는 동탄성계수 및 동전단탄성계수로부터 관계식을 이용하여 구할 수 있으며, 본 연구의 계속적인 과제로서 연구실험중이다. 도달시간시험법 및 공명진동수실험법의 개략도는 Fig 1에 나타난 바와 같다.

한편, 시험체의 감쇠비는 공명진동실험법에 의해서 감지된 가속도의 Frequency Spectrum곡선으로부터 구한 1차 공명진동수곡선에 대한 Polynomial Curvefitting법 및 기하학적인 해석방법을 이용하여 계산하였다.

3.1 도달시간실험법⁽¹¹⁾

사용된 FFT Analyzer는 B&K사의 2035기종으로서 시험체의 한쪽 단에서 가진 된 종방향파가 다른 한쪽 단에 도달되는 시간을 측정된 후 파의 전달속도를 이용하여 동탄성계수를 계산하였다. 실험법의 개략도는 Fig 1과 같다.

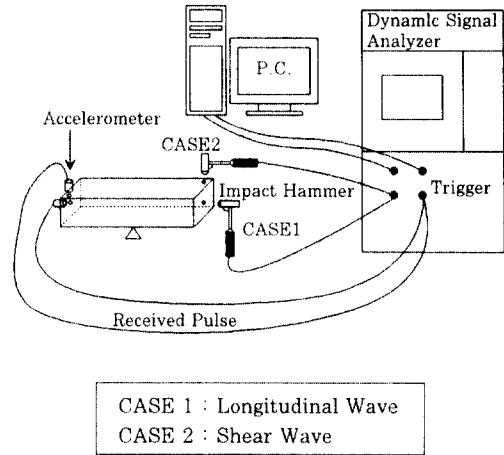


Fig. 1 Schematic Diagram of the Travel Time and the Resonant Column Method

Fig 1에서와 같이 Channel A의 가진햄머로서 시험체를 한쪽 단에서 가진 한 후, Channel B의 가속도계로서 시험체내에 발생하는 가속도를 감지하였으며, 이때 발생된 파는 모든 절점이 파동이 전달되는 방향에 평행으로 움직이는 Compressed Wave이며, 파의 도달시간은 Channel A와 Channel B의 입력시간의 차이를 이용하여 파의 전달속도를 산출한다. 시간은 10^{-7} sec까지 측정하였으며, 종파의 전달속도를 구속탄성계수의 함수로 나타내면 $v_p = \left(\frac{E_p}{\rho}\right)^{1/2}$ 이며, E_p 는 구속탄성계수(Confined Modulus of Elasticity), ρ 는 시험체의 밀도로서 $\rho = \frac{\gamma}{g}$ 로 쓸 수 있다. γ 는 시험체의 단위중량이며 g 는 중력가속도이다. 따라서, 식 (1)을 이용하여 재료의 동적특성 즉 구속탄성계수(E_p)를 계산할 수 있으며 도달시간법에 의한 재령 28일 이

상 시험체의 동적특성 실험결과는 Table 6에 정리하였다. Table 6에서 보인 바와 같이 전달속도 측정을 위하여 사용된 시험체의 길이는 41.2cm로서 정확한 값을 측정하기에는 다소 적은 길이로 판단되며 3회 이상 측정후 평균값을 사용하였다.

$$E_p = \rho v; \quad (1)$$

Table 6 Dynamic characteristic measured by the travel time method

Specific Number	Specific Weight (kg)	Velocity of Longitudinal Wave (cm/sec)	Specific density(ρ) ($\times 10^{-4}$ kg/cm ⁴ /sec ²)	Confined Elastic Modulus (kg/cm ²)
F0	6.622	385948	2.143	319212
F1	5.728	450273	1.854	375891
F2	5.356	450273	1.734	351561
F3	5.080	385848	1.644	244883
F4	4.716	540329	1.526	445524
F5	4.383	450273	1.419	287696
L05	5.860	270164	1.897	138459
L10	5.898	337705	1.909	217711
L15	5.422	385948	1.755	261418
L20	5.384	450273	1.743	353386
L25	5.314	450273	1.720	348723
L30	5.511	540329	1.784	520848
R05	6.036	245604	1.954	117868
R10	5.764	270164	1.866	136197
R15	5.661	245064	1.832	110509
R20	5.502	245064	1.781	107432
R25	5.272	225137	1.706	86471
R30	4.720	207818	1.528	65992
P05	6.429	270164	2.081	151889
P10	6.046	245064	1.957	118049
P15	6.172	180109	1.998	64814
P20	6.166	207818	1.996	86204
P25	5.998	245064	1.941	117084
P30	5.818	300182	1.883	169676

* 시험체의 규격 : 10.2cm(W) × 7.5cm(H) × 41.2cm(L)

3.2 공명진동실험법^[11,12,13]

KS F 2437에 의한 공명진동실험법은 도달시간 실험법과 마찬가지로 B&K사의 2035기종을 이용하였으며, 충격해머에 의해서 가진 된 종파의 가속도곡선으로부터 Frequency response Spectrum 곡선을 구하여 이로부터 1차공명진동수를 측정하였다. 종파에 의한 동탄성계수(E_{D_1})는 식 (2)와 같이

측정된 1차공명진동수값을 이용하여 산출하였으며 지점조건을 변화시키면서 즉 시험체를 중앙지지점(자유단-자유단보)과 양단지지점(단순보)으로하여 실험을 수행하였다. 한편, 횡진동에 의한 동탄성계수(E_{D_2})는 마찬가지로 1차 공명진동수로부터 구할 수 있으며 양단지지점(단순보)조건으로 동탄성계수를 구하였다.

$$E_{D_1} = C_1 W f_1^2, \quad E_{D_2} = C_2 W f_2^2 \quad (1)$$

상기 식에서 f_1, f_2 는 각각 종파, 횡진동파의 가속도곡선의 1차공명진동수값을 나타내며, W는 시험체의 중량을 나타낸다. 그리고 $C_1 = 408 \times 10^{-5} \frac{L}{A} (s^2/cm^2)$, $C_2 = 960 \times 10^{-5} \times \frac{L^3}{W} (s^2/cm^2)$ (각주공시체)로서 L은 시험체의 길이, A는 시험체의 단면적, T는 수정계수로서 본 실험에서는 2.165를 사용하였다.

Fig 2는 기포콘크리트의 제진재 배합비 1 : 5(시험체명 F5)인 경우의 중앙지지점 시험체에 대한 종진동 즉 종파의 가속도곡선을 FFT(Fast Fourier Transform)기법으로 Fourier 변환된 Frequency response Spectrum 곡선의 Real Part를 나타낸 것이다. 그림에서 보이는 바와 같이 1차공명진동수값을 명확하게 구할 수 있다.

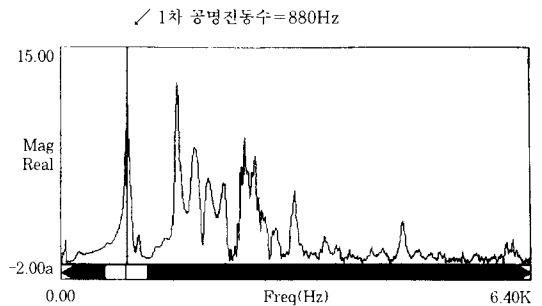


Fig. 2 Frequency Resoponse spectrum for the resonant column method

한편, Table 7은 공명진동실험법에 의한 동탄성계수의 실험결과를 보여주고 있으며 지지점 조건을 달리하여 실험한 모든 경우의 결과이며 중앙은 중앙지지점(자유단-자유단보) 그리고 양단은 양단지지점(단순보)의 경우를 나타내는 것이다.

Table 7 Dynamic Characteristic Measured by the Resonant Column Method

Specific Number	1st Resonant Frequency by Longitudinal Wave (Hz)		1st Resonant Frequency by Shear Wave(Hz)	Dynamic Elastic Modulus (kg/cm ²)		
	Free-Free (*)	Simple (**)		Longitudinal Wave Free-Free(*)	Longitudinal Wave Simple(**)	Shear Wave Simple(**)
F0	4330	4340	1500	272769	274030	285474
F1	3840	3870	1400	185565	188476	215107
F2	3530	3590	1300	146629	151656	173429
F3	3860	3310	1240	166291	122278	149659
F4	3050	3080	1160	96384	98289	121586
F5	2660	2690	992	68134	69680	82640
L05	3790	3840	1340	184929	189841	201606
L10	3710	3740	1340	178354	181250	202913
L15	3540	3590	1280	149278	153525	170206
L20	3570	3580	1300	150755	151601	174336
L25	3400	3420	1230	134961	136554	154038
L30	3220	3230	1180	125537	126318	147025
R05	3550	3610	1260	167123	172820	183606
R1C	3260	3290	1200	134583	137071	159031
R15	2980	3000	1130	110447	111935	138499
R2C	2620	2640	960	82976	84248	97154
R25	2330	2400	920	62882	66716	85496
R3C	2010	2020	752	41895	42313	51141
P05	2580	2740	1420	94018	106041	248379
P10	3800	3860	1410	191807	197912	230304
P15	3840	3880	1400	199949	204136	231781
P20	3820	3860	1360	167679	201840	218513
P25	3720	3720	1300	182357	182357	194218
P30	3550	3580	1240	161087	163821	171401

(註) Free-Free(*) : 중앙지지점 시험체 Simple(**) : 양단지지점 시험체

3.3 공명곡선에 의한 감쇠비 측정

공명진동실험법에 양단지지시험체에 횡진동과의 가속도곡선으로부터 구한 Frequency Spectrum 곡선에 Polynomial Curvefitting법 및 기하학적인 해석방법을 이용하여 다음과 같이 시험체의 감쇠비를 산출하였다. 각 방법의 결과는 Table 8에 정리하였다.

3.3.1 Polynomial Curvefitting Method^[3]

횡진동실험은 양단지지시험체의 중앙부 상부에 충격해머로서 가진하여 시험체 중앙부 하단에 부착된 가속도 감지기로부터 가속도 곡선을 측정하였다. 측정된 가속도 곡선은 FFT Analyzer로

Fourier 변환된 Frequency response Spectrum 곡선의 Real Part로부터 1차공명진동곡선을 구하여 Fig 3과 같이 시험체의 감쇠비를 계산하였다. 감쇠비 계산을 위한 Curvefitting Model은 다음과 같다.

$$H(i\omega) = \frac{(r_1 \sigma_k + r_2 \omega_k + i r_3 \omega)}{(\sigma_k^2 + \omega_k^2 - \omega^2 + 2i \sigma_k \omega)} + A_0 + A_1(i\omega) + A_2(-\omega^2) \tag{3}$$

여기서, A₀, A₁, A₂는 Residual function coefficients를 나타내며 σ_k는 k번째 모드의 감쇠비, ω_k는 Modal Frequency이다. 또한, Dual Channel Analysis에서 Frequency Response

Function은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$H_{ijk} = \sum_{k=1}^n \left[\frac{\gamma_{ijk}}{s - p_k} + \frac{\gamma_{ijk}^*}{s - p_k^*} \right] \quad (4)$$

여기에서

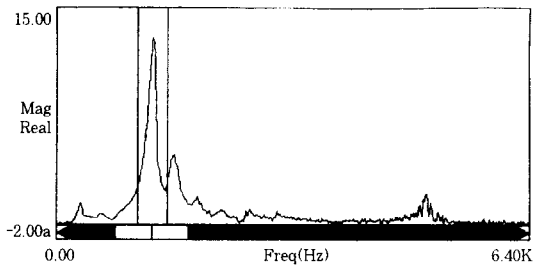


Fig. 3 Example of damping ratio to be measured by the polynomial curvefitting method

$p_k = -\sigma_k + j\omega_k$, i 및 j 는 각각 Response 및 Input를 나타내며 k 는 DOF, s 는 Laplace Variable을 의미한다.

Fig 3은 Polynomial Curvefitting Method에 의한 감쇠비 측정의 예를 보이고 있으며 Latex



Photo 2 Photo graph for the damping ratio by the dynamic signal analyzer

Table 8 Damping ratio results by geometrical analysis

Specific Number	Polynomial Curve Fitting Method		Geometrical Analysis Method				
	Ist Resonant Frequency	Damping Ratio(%)	f_1	f_2	Δf	f_m	Damping Ratio(%)
F0	1500	1.11	1500	1550	50	1530	1.63
F1	1400	1.34	1360	1420	60	1400	2.14
F2	1300	1.58	1240	1310	70	1280	2.73
F3	1240	1.30	1180	1290	110	1260	4.36
F4	1160	1.96	1090	1180	90	1150	3.91
F5	992	2.50	936	1030	94	1000	4.7
L05	1340	1.99	1300	1380	80	1350	2.96
L10	1340	2.00	1320	1400	80	1370	2.99
L15	1280	2.22	1220	1320	100	1290	3.88
L20	1300	2.62	1210	1300	90	1270	3.54
L25	1230	2.16	1150	1240	90	1200	3.71
L30	1180	2.39	1110	1210	100	1170	4.27
R05	1260	1.53	1260	1340	80	1310	3.05
R10	1200	1.74	1100	1170	70	1140	3.07
R15	1130	1.61	1010	1080	70	1050	3.33
R20	960	1.83	856	928	72	900	4.00
R25	920	2.06	804	888	84	860	4.88
R30	752	2.08	608	668	60	648	4.63
P05	1420	1.88	692	932	240	840	1.43
P10	1410	1.49	1320	1390	70	1360	2.57
P15	1400	1.43	1300	1360	60	1340	2.24
P20	1360	1.77	1320	1380	60	1360	2.21
P25	1300	1.40	1290	1370	80	1340	2.98
P30	1240	1.48	1190	1270	80	1240	3.23

Concrete의 시험체명 L20에 대한 실험 예이다. Table 8은 Polynomial Curvefitting방법에 의한 시험체의 감쇠비 측정결과를 나타낸 것이다. 또한, Photo 2는 Dynamic Signal Analyzer를 이용한 감쇠비측정을 위한 출력화면을 나타낸다.

3.3.2 공명곡선에 의한 기하학적 해석법^[2,14]

공명곡선의 기하학적 해석을 통한 감쇠비 계산방법은 Fig. 4와 같다. 공명곡선의 기하학적인 해석법은 고전적인 방법의 하나로서 곡선의 상대적인 Sharpness를 이용하여 감쇠비를 측정하는 방법이다. 따라서 대수감쇠율(Logarithmic Decrement) δ 는 다음과 같이 쓸 수 있다. 다음 식은 참고문헌 [2]에 따른 것이다.

(5)

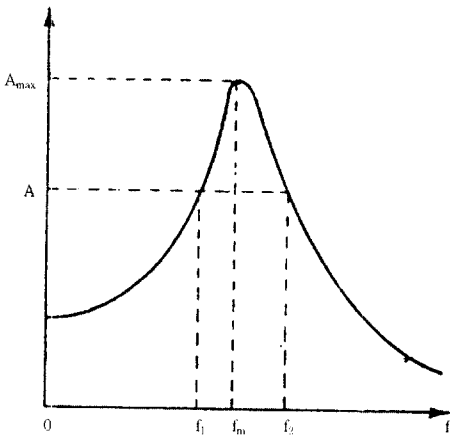


Fig. 4 Geometric shapes of response curve for the determination of damping ratio

$$\delta = \frac{\pi}{2} \frac{f_2^2 - f_1^2}{f_m^2} \sqrt{\frac{A^2}{A_{max}^2 - A^2} \frac{\sqrt{1-2D^2}}{1-D^2}}$$

윗 식에서 감쇠비 D가 무시할 정도로 작다면 마지막 항은 1.0과 같다. 또한 A의 값을 최대값의 0.707배한 값($A=0.707A_{max}$)을 취한다면 윗 식은 $\delta = \pi \frac{\Delta f}{f_m}$ 이고 여기에서, $\Delta f = f_2 - f_1$ 이다. 즉, $\delta = 2\pi \frac{D}{\sqrt{1-D^2}}$

이고, $D \approx 0$ 이면, $\sigma = 2\pi D$ 이므로 $D = \frac{1}{2\pi} \delta$ 이다. 따라서, 감쇠비를 진동수에 대한 함수로 다시 쓰면 다음과 같다.

$$D = \frac{1}{2} \frac{\Delta f}{f_m} \quad (5)$$

감쇠비 측정방법은 Frequency response Spectrum곡선의 Real Part에서의 1차공명진동수를 일으키는 곡선에서 최대 진동수와 이에 대응하

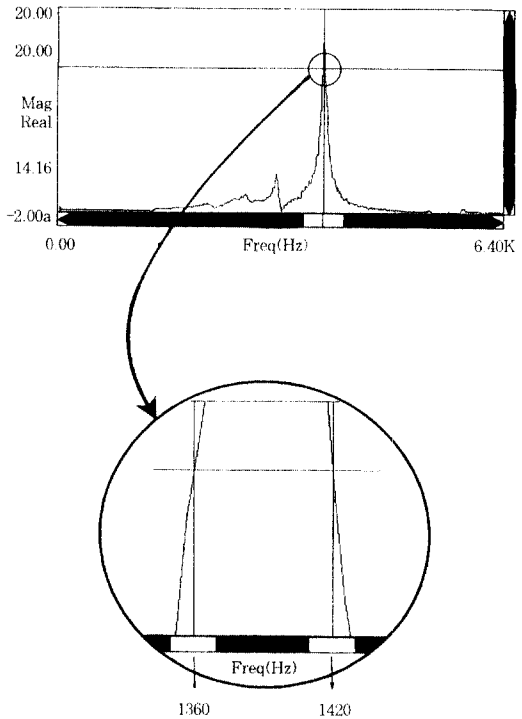


Fig. 5 Example of damping ratio to be measured by the geometric analysis

는 Magnitude를 구하고 이 값에 0.707을 곱한 값에 대응하는 진동수를 찾는다. 이 진동수의 큰 값과 작은 값의 차이를 이용하여 감쇠비를 구하였다. 계산 결과는 Table 8과 같다. Fig. 5는 기하학적인 해석을 이용한 감쇠비 산출의 예이며 이는 Foam Concrete의 배합비 1 : 1인 경우(시험체명 F1)의 실험 예이다.

Table 7 및 Table 8에서 보인 바와 같이, 시험체 P05의 경우의 공명진동실험법에 의한 동탄성계수

및 감쇠비는 다른 시험체에 비하여 특이한 결과를 보여주고 있다. 이는 Table 8에서 보인 바와 같이 P05 및 P10의 시험체 중량등으로부터 유추하면 시험체의 배합에 약간의 오류가 발생한 것으로 사료되며 따라서, 추후의 실험에는 적정수량의 시험체에 대한 측정값이 요구된다.

4. 종합평가 및 결론

압축강도는 제진재의 혼입률이 높을수록 강도가 저하되었으며 Plastic Resin이나 Rubber Powder의 경우에는 현저히 강도가 저하되는 것으로 나타났다. 이는 제진재료가 콘크리트내에서 공극(Void)의 형태로 남아 콘크리트의 밀도를 감소시키고 이에 따라 압축강도가 저하되는 결과를 나타내며 반면, 제진재의 영향으로 감쇠비의 증가를 나타낸다. 혼입률의 증가에 따른 강도의 감소경향이 Latex Concrete가 가장 작은 경향을 보였다. 하지만, 경화가 늦어져 3일 압축강도를 측정할 수 없었다. Rubber Powder Concrete의 경우에는 압축강도와 감쇠비의 역함수관계 즉, 감쇠비가 증가하면 압축강도가 저하되는 일정한 연관성이 있는 것으로 보이나 다른 콘크리트의 경우에는 연관성을 찾을 수 없었다.

도달시간법에 의한 동탄성계수는 파의 전달속도에 비해 짧은 시편길이에 의한 도달시간의 측정에 대한 정밀도가 문제가 되어 신뢰성이 떨어지는 결과를 나타내었다. 공명진동수법에 의한 동탄성계수는 횡진동이 종진동에 의한 방법보다 약 15~23% 정도 크게 나타났으며 종진동의 경우 양단지지 및 중앙지지조건에 따라 약간의 차이는 있었으나 차이가 거의 없는 것으로 보인다. 또한 콘크리트시방서에 주어진 실험식에 의한 정탄성계수에 비해서는 통상 5~20% 정도 큰 값을 나타내고 있다.

감쇠비는 제진재의 종류나 배합비에 따라 일정한 경향을 나타내지는 않았지만 대체로 제진재의 혼입률이 클수록 감쇠비가 증가하는 경향을 나타내었다. 기하학적인 해석방법의 경우에는 1.43~4.88% 정도를 보이고 있으며 제진재가 혼입되지 않은 일반콘크리트가 1.63%로 작은 값을 나타내고 있으며 Latex와 Rubber Powder를 혼입한 콘크리트가 상

대적으로 감쇠비가 크게 나타나고 있다. Polynomial Curvefitting Method에 의한 감쇠비는 1.11~2.50%를 나타내고 있으며 제진재가 혼입되지 않은 일반콘크리트의 경우 1.11%가 가장 작은 값을 나타내고 있다.

본 실험을 통하여 제진재료를 이용한 제진콘크리트의 제작에는 아직 많은 실험이 추가되어야 하리라 판단되며 여러 제진재료 가운데서 Latex콘크리트가 상대적으로 높은 압축강도를 보이고 있으며 동시에 감쇠효과도 뛰어났으나 제진재의 혼합비율과 감쇠비와의 명확한 상관도는 더욱 많은 실험결과를 기초로 추후에 제시될 수 있으리라 생각된다. 도달시간법에 의한 구속탄성계수의 측정값은 제작된 시험체의 크기 및 도달시간측정의 정밀도에 따라 신뢰성이 좌우된다고 판단되며 이를 해결하기 위해서 보시험체의 길이를 증가시키고 측정시간의 정도를 더욱 크게 해야 할 것이다. 공명진동실험법에 의한 동탄성계수는 지지조건에 의한 차이와 종진동과 횡진동의 차이로 나눌 수 있으며 전자는 지지대를 따라 파의 전달이 이루어져 약간의 차이를 보이고 있으며 후자는 진동의 형태에 따라 각각 다른 상수를 이용하여 동탄성계수를 구함으로써 발생할 수 있는 오차로 사료된다. 일반적으로 동탄성계수와 압축강도와의 관계는 콘크리트의 배합, 양생방법, 재령에 따른 기초자료를 확보하기 위하여 많은 실험을 수행하여야 하리라 판단된다.

감쇠비의 측정결과는 제진콘크리트가 제진재료가 혼입되지 않은 일반 콘크리트에 비해서 상당한 감쇠비의 증가를 보이고 있다. 기하학적인 해석법에 의한 감쇠비의 측정은 다양한 가정값이 도입되므로 Polynomial Curvefitting Method에 의한 감쇠비 값이 더 신뢰할 수 있으리라 사료된다. 실험결과를 토대로 보았을 때 제진재료로서 Latex가 가장 유용하리라 판단되며 압축강도면에서도 상대적으로 양호하였다. 그리고 포아손비 및 동전단탄성계수 등 추가의 제진콘크리트의 동적특성을 파악하기 위한 실험이 현재 계속중이며 전단파의 발생에 따른 동전단탄성계수의 실험방법인 KS F 2437의 규정은 오차가 많이 발생하는 것으로 조사되었다.

5. 감사의 글

본 연구는 1994년도 한국과학재단 특정연구(과제번호: 94-0600-05-01-3) 지원비에 의해 수행되었으며, 이에 사의를 표합니다. 한편, 본 연구를 위해 계속적인 지원을 하여 주신 금호석유, 유공기술연구소, Sika Korea, 한국산업(주) 및 농어촌진흥공사의 관계자 여러분들께 감사의 마음을 표합니다.

참 고 문 헌

1. 박 승범, 문운당 "최신토목재료 실험", 1994
2. Richart, Hall and Woods "Vibrations of soils and foundations "
3. R.B. Randall, B. Tech., B.A. "Frequency Analysis", Brüel & Kjær
4. William T. Thomson "Theory of Vibration with Applications", Prentice Hall, 1988.
5. A. Major "Dynamics in Civil Engineering", Academiai Kiado Budapest
6. 지하철 시설물의 진동영향에 관한 세미나, 1993.12.2, 서울특별시 지하철공사
7. 콘크리트 표준시방서, 대한토목학회, 1989
8. Mehta, P.K., "Concrete : Structure Properties and Materials," Pentice-Hall, 1986
9. ACI, "Designing for Creep and Shrinkage in Concrete Structures, SP-76, 1983
10. ACI Committee 213, Report 213R-79, "Guide for Structural Lightweight Concrete," Concr. Int., Vol. 1, No. 2, 1979
11. 한국공업규격, "콘크리트 공시체의 가로 세로 및 비틀림 1차 주파수 실험방법", 한국공업진흥청 1990
12. ASTM C 597-71, Standard Method of Test for Pulse Velocity Through Concrete.
13. 日本工業規格, JIS A 1127-1976, 共鳴振動によるコンクリートの剪断弾性係數, 動せん断弾性 係數及び動ポアソン比實驗方法
14. BRAJA M. DAS, "Principles of Soil Dynamics", Pws-kent, 1992
15. J. S. Bendat, A. G. Piersol, "Engineering Applications of Correlation and Spectral Analysis" 1993, John Wiley & Sons, Inc
16. 정영수, 이대형, 최우성 "진동억제 콘크리트 개발에 관한 실험적 연구" 한국콘크리트학회 봄 학술발표회 논문집, 1996
17. 정영수, 이대형, 정철희 "진동억제 콘크리트 개발에 관한 실험적 연구" 한국콘크리트학회 가을 학술발표회 논문집, 1995
18. 정영수, 이대형 "진동억제 콘크리트의 물성에 관한 실험적 연구" 대한토목학회 학술발표회 논문집, 1995

(접수일자 : 1996. 6. 5)